

アンテナの放射効率低下メカニズムに関する一検討

| | |
|-----|---|
| 著者 | 有馬 卓司, 宇野 亨 |
| 雑誌名 | SENAC : 東北大学大型計算機センター広報 |
| 巻 | 48 |
| 号 | 4 |
| ページ | 43-47 |
| 発行年 | 2015-10 |
| URL | http://hdl.handle.net/10097/00124901 |

[共同研究成果]

アンテナの放射効率低下メカニズムに関する一検討

有馬 卓司, 宇野 亨

東京農工大学 大学院工学研究院 先端電気電子部門

アンテナは、電磁波と通信信号のインターフェイスを果たす重要なデバイスである。一方、良導体のみで構成したアンテナにおいてもその条件により、アンテナ放射効率の低下が起きる事が知られている。このメカニズムは解明されていない。本研究では、このメカニズム解明のために、大型計算機を用いた大規模シミュレーションにより解明するものである。本報告では、アンテナの放射効率の要因の一つであると考えられる、良導体の表面粗さを考慮した解析を行う。そして、導体の表面粗さが、その導電率に及ぼす影響について検討した。導体の表面粗さは実際に測定した値を用い、放射効率に関しては、FDTD 法に表面粗さを組み込んでシミュレーションを行い評価している。

1. はじめに

スマートフォンなどの携帯情報端末をはじめとする、電磁波を用いた機器の増加により、アンテナの重要性はますます高まっている。アンテナの放射効率は、入力電力に対してどれだけ電磁波を放射したかの比で定義されるが、当然その効率はより高いものが望まれる。そのため、アンテナは高い放射効率を得る目的で良導体を用いて構成される。一方、これまでの研究により、良導体のみで構成したアンテナにおいてもその条件により、アンテナ放射効率の低下が起きる事が知られている[1, 2]。このメカニズムは十分に解明されているとは言えない[3, 4]。一方、アンテナを構成する導体板の表面の粗さがその導電率に及ぼす影響について議論されている。すなわち導体自体の導電率は高いのであるが、その表面の粗さによって導電率が低下することが指摘されている。アンテナにおいては、放射において表面上に電流が集中することからその影響は大きいと考えられる。文献[5]においては、導体の表面粗さを等価的な式で導電率の変化を表している。本研究では、文献[5]と同様にアンテナを構成する導体板の表面粗さを、導電率の変化に置換え、その放射効率に対する影響を検討した。導体板の表面粗さはいくつかのサンプルを用いて実際に測定した値を用いた。また、放射効率については、表面粗さを導電率の変化に置換えた値を用いて、FDTD 法[6]を用いたシミュレーションにより評価した。FDTD 法の解析時間の高速化については、東北大学サイバーサイエンスセンターの協力を得た。

2. 導体板の表面粗さの測定結果

本節では、実際の導体板の表面粗さを調べるために、レーザマイクロ스코プと呼ばれる光学機器を用いて導体板表面の粗さを測定し、二乗平均粗さ(Root Mean Square: RMS)を算出する。RMS は次式で定義される。

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l f(x)^2 dx} \quad (1)$$

ここで $f(x)$ は基準としたところからの高さであり、この変化が粗さに相当する。レーザマイクロ스코プは KEYENCE 製 VK-X100 を用い、RMS の算出には KEYENCE 製の VK Analyzer というソフ

トウェアを用いた。本研究では、誘電体基板上に作製されるアンテナを想定しているために、測定は新品の両面銅箔誘電体基板（厚み 1.6 mm）を 4 つのサンプルで測定した。サンプルはそれぞれ、サンプル A～サンプル D と区別する。未使用の状態のサンプル A、サンプル B、数カ月屋外に放置したサンプル C、サンプル D について表面粗さを測定した。その結果、サンプル A が $0.309\ \mu\text{m}$ 、サンプル B が $0.337\ \mu\text{m}$ 、数カ月屋外に放置したサンプル C、サンプル D は共に $0.396\ \mu\text{m}$ となった。銅箔基板の表面粗さは、雨などにさらされることにより大きくなることが分かった。これは、銅や誘電体基板の特性変化によると考えられる。各サンプルについて $234\ \mu\text{m} \times 175\ \mu\text{m}$ の範囲で表面粗さを測定し、位置が高い部分を赤く、低い部分を青く表示した結果をそれぞれ図 1 に示す。図 1 より、周期的に山と谷が分布しているのが確認でき、およそ $1\ \mu\text{m}$ 周期で山と谷があるのが確認できる。最大値と最小値の差は、およそ $3\ \mu\text{m}$ であり、 $1\ \mu\text{m}$ の周期で表面粗さが発生していることが分かる。これは、銅箔基板が作製される際の工程によるものと推測される。また、図より全体的な周期の中に複雑な粗さが混在していることが分かる。

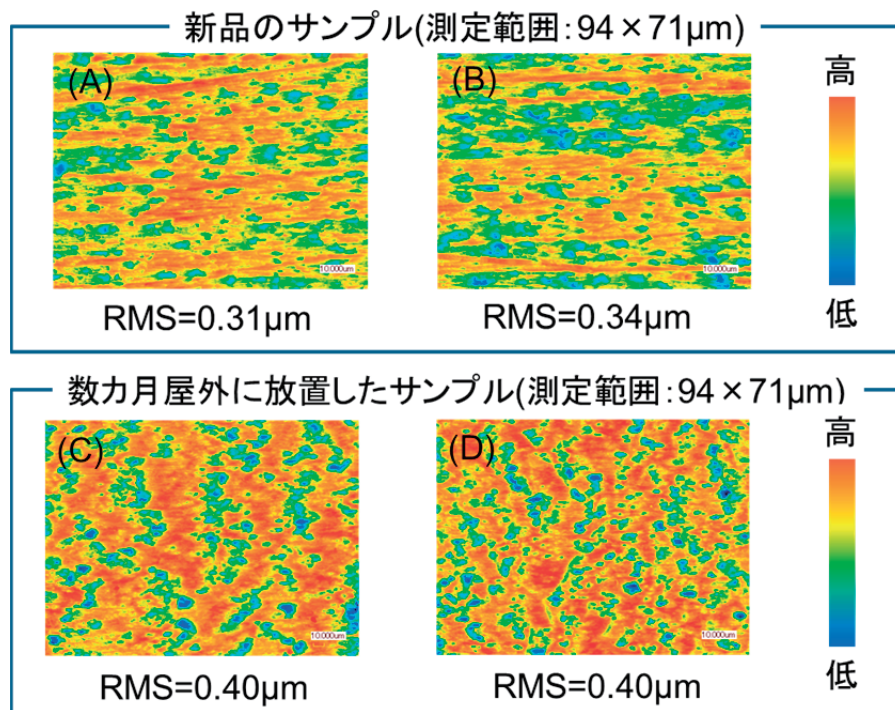


図 1： 導体板表面の粗さ測定結果

3. 表面粗さと損失の関係

本研究では文献[5]にならって、導体の表面粗さによる導電率の低下としてモデル化する。文献[5]によると、粗さによる損失の増加係数 α を表面が滑らかな場合の抵抗率 α_0 で表すと、次式のようになる。

$$\alpha = \alpha_0 K_{\text{sr}} \quad (2) \quad K_{\text{sr}} = 1 + \frac{2}{\pi} \arctan \left[1.4 \left(\frac{\Delta}{\delta} \right)^2 \right] \quad (3)$$

ここで、 K_{sr} は Hammerstad と Jensen によりマイクロストリップ線路の計測から得られた式[5]、 Δ は導体表面の粗さの RMS (二乗平均平方根)、 δ は表皮深さを表す。 δ は周波数と導電率などによって変化し $\delta = \sqrt{2 / (\omega \mu \sigma)}$ の関係がある。(2)、(3) 式より、 Δ が大きく、 δ が小さくなるほど導体の損失係数が増加することがわかる。この変化を図 2 に示す。

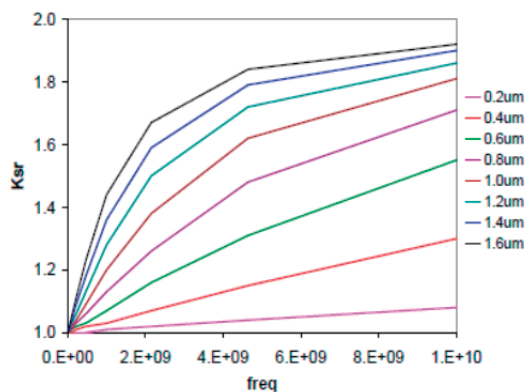
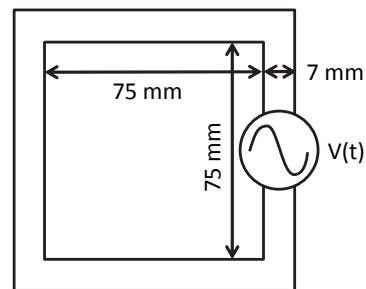
図 2: K_{sr} の変化

図 3 ループアンテナモデル (1GHz)

図 2 では Δ を $0.2 \mu\text{m}$ ～ $1.6 \mu\text{m}$ まで変化させた際の K_{sr} を示している．図より Δ と周波数が大きくなるにつれて， K_{sr} がおよそ 2 に収束しているのがわかる．これは，周波数が十分に大きくなることで完全に導体表面の粗さに沿って電流が流れるようになり，これ以上周波数が増加しても電流の移動距離が増加しなくなるからであると考えられる．この式を用いることで，使用する導体の透磁率，導電率，表面粗さの RMS をパラメータとして入力すれば，導体の周波数による導電率の変化を求めることが可能となる．

4. ループアンテナの放射効率と表面粗さの関係

本節では，これまでの検討より求めた表面粗さと導電率の変化を実際にアンテナ問題に適応しその放射効率の変化を FDTD 法シミュレーションにより求める．FDTD 法の高速度に関しては東北大学サイバーサイエンスセンターの協力を得て実施した．ループアンテナのモデルを図 3 に示す．1 GHz の解析においては図 3 に示すように，アンテナの幅を 7 mm，一辺の長さを 75 mm としている．解析は 1 GHz，5 GHz，10 GHz としているので，すべての周波数においてアンテナの全長が 1 波長となるように，周波数によってアンテナの大きさを変化させている．この正方形ループアンテナに正弦波を入力し，FDTD 法により放射効率を計算した．FDTD 法における放射効率の求め方は，入力電力をアンテナの給電電流 $I(t)$ と電圧 $V_0(t)$ より下記(4)式で，また放射電力 P_{rad} を(5)式で，そして放射効率 η を(6)式で求めている．

$$P_{in} = \frac{1}{T} \int_0^T V_0(t) I(t) dt \quad (4) \quad P_{rad} = \frac{1}{T} \int_0^T \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \frac{|D(\theta, \phi)|^2}{Z_0} \sin \theta d\theta d\phi dt \quad (5) \quad \eta = \frac{P_{rad}}{P_{in}} \quad (6)$$

ここで， T は励振波の周期， P_{rad} の積分範囲はアンテナを囲む閉曲面である．また，FDTD 法のセルサイズは 1 GHz の解析では 0.1 mm と細かく設定している．

アンテナ導体の表面が滑らかな場合と粗さの RMS が $0.3 \mu\text{m}$ ， $1.0 \mu\text{m}$ の場合について，周波数を 1 GHz，5 GHz，10 GHz としたときの放射効率と導電率の関係をそれぞれ図 4 に示す．ここでは，アンテナの材料として銅およびその他の金属を想定している．銅の一般的な導電率は， $5.8 \times 10^7 \text{ S/m}$ 程度であるが，鉄などの導電率が若干下がる媒質ではその数百分の一程度であることから，ここでは，導電率を $5.8 \times 10^7 \text{ S/m}$ から $5.8 \times 10^4 \text{ S/m}$ 程度まで計算を行った．表面粗さ RMS を，測定地に近い $0.3 \mu\text{m}$ ，粗さの無い $0 \mu\text{m}$ ，および測定地の 3 倍程度粗い $1 \mu\text{m}$ として解析を行った．図 4 に示す放射効率の結果では，表面が粗い場合の効率は，滑らかな場合に比べて最大で 2.4 % ほど減少していることがわかった．

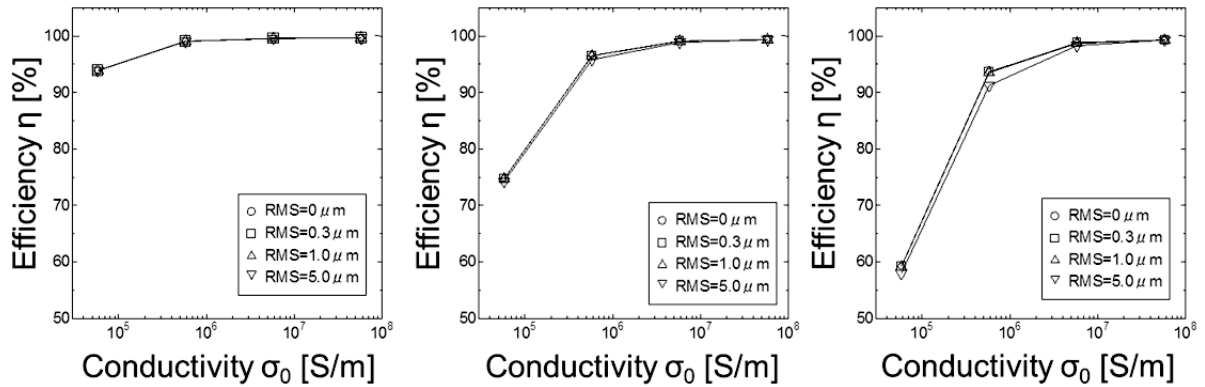


図 4： ループアンテナ放射効率と表面粗さ（左：1GHz，中：5GHz，右：10GHz）

続いてアンテナが誘電体上に構成された際のシミュレーションを行った．誘電体の比誘電率は 4.3 とした．その解析結果を図 5 に示す．

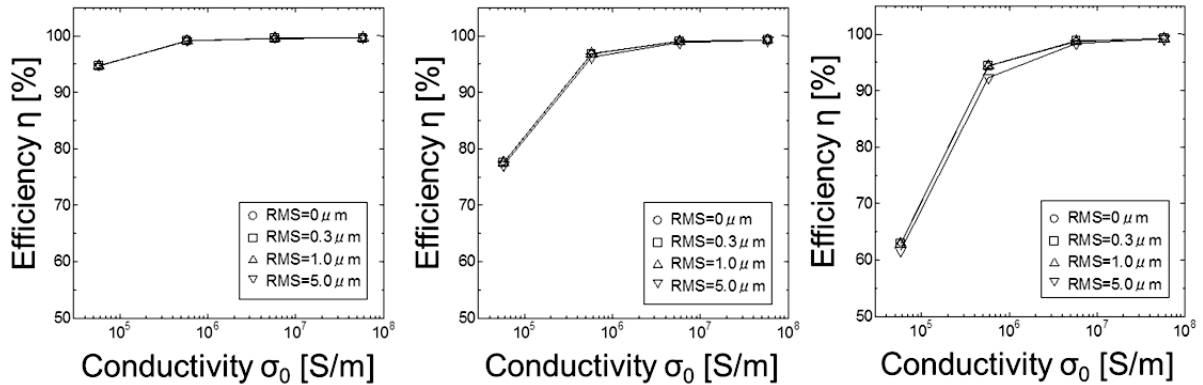


図 5： 誘電体上ループアンテナ放射効率と表面粗さ（左：1GHz，中：5GHz，右：10GHz）

このモデルにおいても先程と同様に，導電率を $5.8 \times 10^7 \text{ S/m}$ から $5.8 \times 10^4 \text{ S/m}$ 程度まで変化させながら計算を行った．表面粗さについてもさきほどと同様に RMS を測定地に近い $0.3 \mu\text{m}$ ，粗さの無い $0 \mu\text{m}$ ，および測定地の 3 倍程度粗い $1 \mu\text{m}$ として解析を行った．図 5 に示す放射効率の結果では，表面が粗い場合の効率は，滑らかな場合に比べて最大で 2.1%ほど減少していることがわかった．

以上の検討より，良導体を用いたアンテナにおいても，その表面粗さにより放射効率が低下することがわかった．しかし，その低下量は数%にとどまっており，今後は表面粗さを実際にモデル化した解析等が必要であると考えられる．

5. まとめ

本研究では，アンテナに実際に用いられる両面銅箔基板の表面粗さを実測し，その粗さを基に，表面粗さを導電率の変化として FDTD シミュレーションに組み込み，アンテナ効率の検討を行った．検討には FDTD 法を用いたシミュレーションにより実施した．解析モデルはループアンテナ単体と誘電体基板上のループアンテナとした．しかし，その低下量は数%にとどまっており今後さらなる検討が必要であると考えられる．今後は，実験や数マイクロメートル以下の表面粗さを実際にモデル化した解析等による検討が必要と考えられる．

謝辞

本研究は、東北大学サイバーサイエンスセンターのスーパーコンピュータを利用することで実現することができた。また、研究にあたっては同センター関係各位に有益なご指導とご協力をいただいた。

参考文献

- [1] 山本雄太, 宇野 亨, 有馬卓司, 何 一偉 "FDTD 法におけるアンテナ放射効率計算法に関する検討", 電子情報通信学会技術研究報告, AP2011-71, pp.37-42
- [2] 山本雄太, 宇野 亨, 有馬卓司" FDTD 法における遠方界を用いたアンテナ放射効率計算法に関する研究 ", 2012 電子情報通信学会全国大会論文集, B-1-175, p. 175
- [3] Naoko Yamada, Kentaro Asami, Takuji Arima, and Toru Uno, "Comparison of MoM and FDTD Calculations of Impedance and Radiation Efficiency for Lossy Planar Antenna," 2005 International Symposium on Antennas and Propagation.
- [4] 浅見 賢太郎, 宇野 亨, 有馬 卓司, "FDTD 法による板状アンテナ効率計算の問題点とその一解決法, " 電子情報通信学会総合大会, 2005.3
- [5] Hammerstad and Jensen, "Accurate Models for Microstrip Computer-Aided Design", IEEE MTT-S Digest, pp407-409, May 1980
- [6] 宇野亨, FDTD 法による電磁界およびアンテナ解析, コロナ社, 1998.